



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Energieversorgung in Europa wandelt sich in den letzten Jahren. Die zunehmende Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen, [1]-[6] die wachsende Elektromobilität mit Lade- und Entlade-Technik sowie neu Smart-Grid Technologien machen das Stromversorgungsnetz komplexer. [7] Die Veränderungen führen zu erhöhten Spannungspegeln, großen Kurzschlussströmen und reduzierter Zuverlässigkeit der Stromversorgung und Netzqualität. Somit ist das traditionelle Modell des unidirektionalen radialen Leistungsflusses nicht länger gültig. Traditionelle passive Verteilungsnetzwerke wechseln allmählich zu aktiven Modellen, um die obigen Probleme zu lösen. Für eine ausreichende Steuerung des Netzes ist es daher erforderlich, dass der Netzzustand „nahezu“ in Echtzeit bekannt ist. Die Zustandsschätzung ist dafür ein passendes Verfahren. In der Literatur gibt es ein breites Spektrum von statischen und dynamischen Zustandsschätzmethoden, siehe z. B. [8] und [27] und die darin enthaltenen Referenzen.

Im Allgemeinen wird ein Stromnetz als symmetrisches System angenommen. Die Methode der symmetrischen Komponenten wird verwendet, um eine vereinfachte Analyse des drei-Leiter Netzes mittels eines einphasigen Systems durchführen zu können. Die Zustandsschätzung verwendet eine Redundanz von Messungen, um die Schätzgenauigkeit zu verbessern. Die klassische statische Zustandsschätzung verwendet gewichtete kleinste Quadrate basierend auf der Annahme von normalverteilten Messfehlern und -gewichten, die sehr erfolgreich im Übertragungsnetzwerk mit ausgeglichenen Lasten verwendet wurden, um den zufälligen Fehler von Messungen zu filtern [8]-[13]. In der Zwischenzeit konzentrierten sich einige Forschungen auf die Verwendung der Zustandsschätzung im Verteilungsnetz unter Berücksichtigung seiner besonderen Merkmale. [14]-[18]

Es gibt kein streng symmetrisches System. Aufgrund der zunehmend häufig unsymmetrischen Belastungen in manchen Bereichen, werden unsymmetrische Erscheinungen immer größer. Deswegen ist die Zustandsschätzung für unsymmetrische dreiphasige Verteilungsnetze von großer Bedeutung, um die Zustände genauer schätzen zu können. Diese wurde für unsymmetrische Dreiphasen-Verteilungsnetze mit verschiedenen Ansätzen übernommen [19]-[23].



In der Literatur [19] werden Spannungswandler, Lasten und Generatoren so angenähert, dass das Problem der Zustandsabschätzung wie bei einphasigem System ähnlich gelöst werden kann. Die Autoren von [20]-[23] schlagen eine Zustandsschätzung auf der Grundlage eines gekoppeltes Dreiphasenmodells [24] vor, bei dem die drei Phasen mit Messungen von Leistung, Strom oder Spannung gekoppelt sind.

Bei einem dreiphasigen Dreileitersystem ist jedoch die Summe der dreiphasigen Ströme immer gleich Null, was zu einer zusätzlichen Redundanz führt. Zum Beispiel entspricht in einem Dreiphasen-Vierleitersystem die Summe der Ströme in den drei Leitungen dem Strom im Neutralleiter, der daher nicht gemessen werden muss.

Weiterhin werden Energiesysteme normalerweise als quasistatische dynamische Systeme definiert, die sich kontinuierlich, aber sehr langsam mit der Zeit verändern. [25] Die statische Zustandsschätzung kann dies nicht berücksichtigen. Dies hat zur Entwicklung einer dynamischen Zustandsschätzung geführt, indem dynamische Modelle für die Zeitentwicklung ausgewählter Netzwerkparameter eingeführt wurden. Zustandsschätzungen werden dann aus zeitaufgelösten Messungen und aus der dynamischen Modellprognose basierend auf den früheren Zeitschätzungen erhalten. Verschiedene Verfahren zur dynamischen Zustandsschätzung wurden für ein symmetrisches Dreiphasensystem vorgeschlagen [26]-[32].

Im Allgemeinen kann die Schätzgenauigkeit der Zustände verbessert werden, indem die Anzahl von Redundanzen, die für das angewandte Verfahren der Zustandsschätzung verfügbar sind, erhöht wird.

## 1.2 Lösungsansatz

Zu dem Zweck, ein unsymmetrisches belastetes System genau zu beobachten, wird in dieser Arbeit eine Anpassung der neuen statischen Zustandsschätzung, die ein unsymmetrisches belastetes System Model mit Nullsummen-Bedingung der Ströme als Nebenbedingung benutzt, vorgeschlagen, um die zusätzliche redundante Information in dreiphasigen Netzen zu berücksichtigen. Ein einfaches dynamisches Model wird nachher in der statischen Zustandsschätzung eingesetzt, um die Eigenschaft des quasistati-



schen Systems zu berücksichtigen. Daraus wird die statische Zustandsschätzung in die dynamische Zustandsschätzung umgewandelt.

Daher wird ein neues statisches und dynamisches Zustandsschätzverfahren für allgemeine Drehstromnetze ohne Neutralleiter mit verbesserter Schätzqualität vorgeschlagen, die durch Einführung zusätzlicher Informationen aus Redundanzen erreicht wird. Die Qualität des neuen Verfahrens wird anhand von Berechnungen, die für die Daten eines realen 10-Knoten Mittelspannungsnetzes (Drehstromnetz ohne Neutralleiter) aus den Niederlanden durchgeführt wurden, demonstriert. Der Vergleich der Ergebnisse der statischen und dynamischen Zustandsschätzung mit denen herkömmlicher Schätzverfahren zeigt, dass das vorgeschlagene Verfahren die Schätzqualität signifikant verbessert.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit orientiert sich am Prozess der Zustandsschätzung, der in dem Blockschaltbild in Abbildung 1.1 dargestellt ist. Für die Zustandsschätzung müssen das mathematische Modell  $h(x)$  und die Nebenbedingungen  $g(x)$  des Systems aufgestellt werden. Damit befasst sich Kapitel 2. Auf die für die mathematische Lösung des Problems notwendigen Jacobi-Matrizen  $J_h(x)$  und  $J_g(x)$  und die Hesse-Matrizen  $H_h(x)$  und  $H_g(x)$  die aus dem Modell und den Nebenbedingungen abgeleitet werden, gehen die Abschnitte 2.4 und 2.5 vertiefend ein.

Eine wichtige Voraussetzung für die Zustandsschätzung ist Beobachtbarkeit. Die Beobachtbarkeitsanalyse ist Gegenstand von Kapitel 4. Wenn das System nicht beobachtbar ist, liefert das mathematische Modell unendlich viele Lösungen, sodass das System keine eindeutige Lösung hat. Durch die Jacobi-Matrix mit den Platzierungen der Messungen wird die Beobachtbarkeit des Stromnetzes bestimmt. Ist das Drehstromnetz nicht beobachtbar, kann es durch das im weiteren Verlauf von Kapitel 4 vorgestellte Verfahren der Zusammenfassung von Knoten oder durch Einsatz von Pseudomessungen in ein beobachtbares System umwandelt werden.

Um die Qualität der Zustandsschätzung anhand eines realen Netzes zu bewerten sind ideale Messwerte notwendig. Reale Messungen, die unbekannte Abweichungen bein-

halten, können diese Voraussetzung aufgrund vorhandener Redundanzen nicht vollständig erfüllen. Um diesem Problem zu begegnen, können nach Eliminierung der Redundanzen mithilfe der sogenannten Leistungsflussberechnung (Kapitel 3), bei der die Anzahl der Messungen der Anzahl der Zustände entspricht, aus den Messwerten die idealen Eingabewerte für die Zustandsschätzung erzeugt werden.

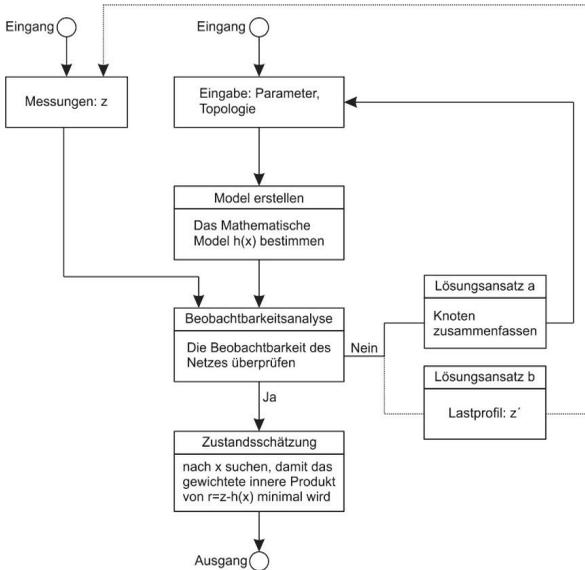


Abbildung 1.1 Blockschaltbild mit den notwendigen Schritten für die Zustandsschätzung

Die mittels Lastflussrechnung bestimmten Daten werden anschließend an den Algorithmus für die Zustandsschätzung übergeben, um eine optimale Lösung zu berechnen. Auf die statische Zustandsschätzung wird in Kapitel 5 näher eingegangen. Kapitel 6 behandelt die dynamische Zustandsschätzung.

In Kapitel 7 werden alle Methoden der Zustandsschätzungen aus Kapitel 5 und 6 im angenäherten beobachtbaren Mittelspannungsnetz durch das Verfahren aus Kapitel 4 getestet.



## 2 Mathematische Modellierung des Mittelspannungsnetzes

Grundlage für eine Zustandsschätzung des Drehstromnetzes ist ein mathematisches Modell des betrachteten Systems, das das reale Verhalten hinreichend genau nachbilden kann. Durch das Modell müssen die aktuellen Zustände des Stromnetzes mit den verfügbaren Eingangsgrößen genau berechnet werden. Das Netzmodell geht auf die Literatur [24] zurück.

Die Größen von Wechselspannung und Wechselstrom werden als komplexe Zahlen dargestellt. Das bedeutet, die Modellierung des Drehstromnetzes kann in einem Polarkoordinatensystem mit Betrag und Phasenverschiebung oder in einem kartesischen Koordinatensystem mit Real- und Imaginärteil erfolgen.

Die Spannung und der Strom im Polarkoordinatensystem zeigen direkt den physikalischen Betriebszustand des Netzes an. Im Hochspannungsnetz kann die Leistungsflussberechnung nach P-Q-Zerlegungsverfahren (P-Q Decomposition Method) in Polarkoordinaten vereinfacht werden [33], [34]. Allerdings werden für die Darstellung im Polarkoordinatensystem trigonometrische Funktionen benötigt. Die zweite Ableitung der trigonometrischen Funktion ist auch eine trigonometrische Funktion, deren Wert sich abhängig von den Zuständen verändert.

Im Gegensatz dazu ist der Strom in komplexen (kartesischen) Koordinaten eine lineare Funktion der Spannung sowie die Leistung ein quadratisches Polynom (Polynomsystem zweiter Ordnung). Somit ist die erste Ableitung der Stromfunktion eine Konstante, die die lineare Leistungsflussberechnung und lineare Zustandsschätzung realisieren kann. Die zweite Ableitung der Stromfunktion und der Leistungsfunktion sind Null beziehungsweise eine Konstante. Eine konstante Hesse-Matrix erhöht die Geschwindigkeit des Algorithmus, der in dieser Arbeit für die optimale Berechnung benutzt wird. Aus diesem Grund werden in der Arbeit die Darstellung von Spannung und Strom im kartesischen Koordinatensystem mit Real- und Imaginärteil verwendet.

## 2.1 Netzmodell

### 2.1.1 Aufstellung des Netzmodells

In Abbildung 2.1 ist das Ersatzschaltbild eines Leitungsabschnitts im Mittelspannungsnetze dargestellt. Die ohmschen Widerstände  $R^{xx}$  und die Selbstinduktivitäten  $X^{xx}$ , die in Längsrichtung der Leitung liegen, werden als Selbstimpedanzen  $\underline{z}^{xx}$  definiert. Die über die gesamte Leitungslänge bestehenden Verkettungen der ohmschen Widerstände  $R^{xy}$  und der Gegeninduktivitäten  $X^{xy}$ , werden als Gegenimpedanzen  $\underline{z}^{xy}$  zwischen den einzelnen Leitern definiert.

$$\underline{z} = R + jX \tag{2.1}$$

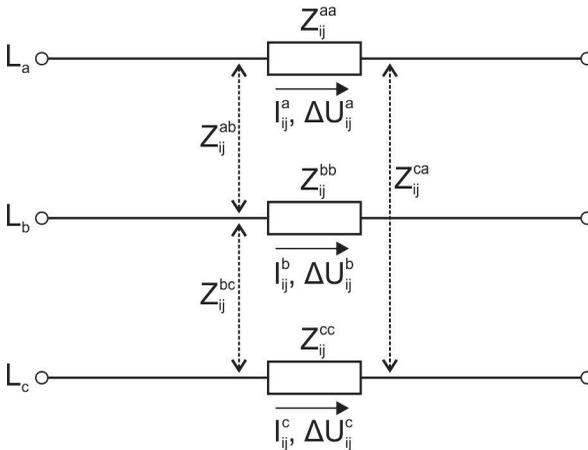


Abbildung 2.1 Ersatzschaltbild eines Leitungsabschnitts im Mittelspannungsnetz mit resistiver und induktiver Verkettung. Die drei Leiters sind durch Gegenimpedanzen  $\underline{z}_{ij}^{ab}$ ,  $\underline{z}_{ij}^{bc}$  und  $\underline{z}_{ij}^{ca}$  mit Gleichung (2.2b) gekoppelt.

Bei dieser Darstellung wird vorausgesetzt, dass das Netz symmetrisch aufgebaut ist. Die Selbstimpedanzen der drei Phasen sind gleich und erhalten den Index s. Es gilt:

$$\underline{z}_{ij}^{aa} = \underline{z}_{ij}^{bb} = \underline{z}_{ij}^{cc} = \underline{z}_{ij}^s$$



Die Gegenimpedanzen zwischen den Phasen sind ebenfalls identisch. Sie bekommen den Index m:

$$\underline{z}_{ij}^{ab} = \underline{z}_{ij}^{bc} = \underline{z}_{ij}^{ca} = \underline{z}_{ij}^m$$

Entsprechend der detaillierten Leitungsnachbildung aus Abbildung 2.1 enthalten die exakten Leitungsgleichungen verteilte Parameter, von denen insbesondere die Widerstände und Induktivitäten frequenzabhängig sind. Für Berechnungen im Anwendungsgebiet kann eine konstante Betriebsfrequenz vorausgesetzt werden. An einer beliebigen Stelle bei fester Betriebsfrequenz gilt dann die folgende lineare Gleichung für den Spannungsabfall  $\Delta \underline{U}_{ij}^x$  über der Leitung in Abhängigkeit vom Strom  $\underline{I}_{ij}^x$ :

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{ij}^a \\ \Delta \underline{U}_{ij}^b \\ \Delta \underline{U}_{ij}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{ij}^s & \underline{z}_{ij}^m & \underline{z}_{ij}^m \\ \underline{z}_{ij}^m & \underline{z}_{ij}^s & \underline{z}_{ij}^m \\ \underline{z}_{ij}^m & \underline{z}_{ij}^m & \underline{z}_{ij}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{ij}^a \\ \underline{I}_{ij}^b \\ \underline{I}_{ij}^c \end{bmatrix} \quad (2.2a)$$

$$\Delta \underline{U}_{ij}^{abc} = \underline{z}_{ij}^{abc} \underline{I}_{ij}^{abc} \quad (2.2b)$$

Die Impedanzmatrix der Leitungen sind unabhängig von der Betrachtungsrichtung, sodass gilt:

$$\underline{z}_{ij}^{abc} = \underline{z}_{ji}^{abc} \quad (2.3)$$

Die Spannungs- und Stromzeiger können entweder in der komplexen Form mit Real- und Imaginärteil oder in der trigonometrischen Form mit Betrag und Phase dargestellt werden. Wie einleitend erwähnt, wird für diese Arbeit die komplexe Darstellungsform mit Real- und Imaginärteil verwendet.

Die Spannung wird in eine reelle Komponente  $e$  und eine imaginäre Komponente  $f$  zerlegt:

$$\underline{U} = e + jf \quad (2.4)$$

## 2.1.2 Symmetrische Komponenten

Mit der Methode der symmetrischen Komponenten [35], [36] kann ein beliebiges unsymmetrisches System, zum Beispiel ein Drehstrom- oder ein Drehspannungssystem, in drei symmetrische Systeme, das Mit-, das Gegen- und das Nullsystem, zerlegt werden. Damit wird die Analyse von unsymmetrischen Zuständen vereinfacht.

Wenn Phase a als Referenz festgelegt wird, dann ergibt sich zwischen den Strömen der drei Phasen und den symmetrischen Komponenten beispielsweise folgende Transformationsbeziehung:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{a(1)} \\ \underline{I}_{a(2)} \\ \underline{I}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.5a)$$

$$\underline{I}_{120} = \underline{T} \underline{I}_{abc} \quad (2.5b)$$

Darin ist  $a$  der Drehoperator, für den gilt:  $a = e^{j120^\circ}$  und  $a^2 = e^{j240^\circ}$ . Die Ströme  $\underline{I}_{a(1)}$ ,  $\underline{I}_{a(2)}$  und  $\underline{I}_{a(0)}$  bezeichnen dabei das resultierende Mit-, Gegen- und Nullsystem.

Analog zu Gleichung (2.5b) für den Strom kann auch die Spannung durch Gleichung (2.6) in ein Mit-, Gegen- und Nullsystem transformiert werden.

$$\underline{U}_{120} = \underline{T} \underline{U}_{abc} \quad (2.6)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2.5b) und (2.6) in Gleichung (2.2b) ergibt sich:

$$\begin{aligned} \underline{T}^{-1} \underline{\Delta} \underline{U}_{ij}^{120} &= \underline{z}_{ij}^{abc} \underline{T}^{-1} \underline{I}_{ij}^{120} \\ \underline{\Delta} \underline{U}_{ij}^{120} &= \underline{T} \underline{z}_{ij}^{abc} \underline{T}^{-1} \underline{I}_{ij}^{120} \\ \underline{T} \underline{z}_{ij}^{abc} \underline{T}^{-1} &= \begin{bmatrix} \underline{z}_{ij}^s - \underline{z}_{ij}^m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_{ij}^s - \underline{z}_{ij}^m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_{ij}^s + 2\underline{z}_{ij}^m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Die Diagonalform der Matrix zeigt, dass die Systeme entkoppelt sind. Wenn die Lasten der drei Phasen symmetrisch sind, fließt der Strom nur im Mitsystem  $\underline{I}_{a(1)}$ . Die anderen



zwei Ströme  $I_{a(2)}$  und  $I_{a(0)}$  sind null. Das bedeutet auch die Leistungen in Gegen- und Nullsystem sind null, wohingegen die Leistung des Mitsystems der Summe der Einzelleistungen der drei Phasen entspricht. Mit dem Verfahren lässt sich das Dreiphasensystem mit symmetrischer Last zu einem Einphasensystem vereinfachen.

Wenn die Lasten der drei Phasen unsymmetrisch sind, fließen die Ströme  $I_{a(2)}$  und  $I_{a(0)}$  in Gegen- und Nullsystem. Die Leistung fließt auch nicht mehr nur im Mitsystem. Weil die Leistung kein Vektor, sondern ein Skalar ist, kann die gemessene Leistung nicht in Mit-, Gegen- und Nullsysteme transformiert werden. Aus diesem Grund können die symmetrischen Komponenten nicht benutzt werden. Das mathematische Modell muss direkt im unsymmetrischen System entwickelt werden.

### 2.1.3 Aufstellung der Leitungsadmittanzmatrix und der Leistungsstromgleichung

Für diese Arbeit wird die Spannung als Zustand definiert. Somit wird Gleichung (2.2b) in folgende Form umwandelt:

$$\begin{bmatrix} I_{ij}^a \\ I_{ij}^b \\ I_{ij}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{ij}^s & z_{ij}^m & z_{ij}^m \\ z_{ij}^m & z_{ij}^s & z_{ij}^m \\ z_{ij}^m & z_{ij}^m & z_{ij}^s \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta U_{ij}^a \\ \Delta U_{ij}^b \\ \Delta U_{ij}^c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Die Kehrwertbildung der Matrix  $z_{ij}^{abc}$  führt zu den komplexen Leitwerten für die verketteten drei-Phase:

$$\begin{bmatrix} y_{ij}^s & y_{ij}^m & y_{ij}^m \\ y_{ij}^m & y_{ij}^s & y_{ij}^m \\ y_{ij}^m & y_{ij}^m & y_{ij}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{ij}^s & z_{ij}^m & z_{ij}^m \\ z_{ij}^m & z_{ij}^s & z_{ij}^m \\ z_{ij}^m & z_{ij}^m & z_{ij}^s \end{bmatrix}^{-1}, \quad (2.9a)$$

$$\underline{y}_{ij}^{abc} = \underline{z}_{ij}^{abc^{-1}} \quad (2.9b)$$



Diese werden auch als Admittanz und somit  $\underline{y}_{ij}^{abc}$  als Admittanzmatrix bezeichnet. Die Admittanzmatrix setzt sich zusammen aus Konduktanz (Realteil)  $\underline{g}$  und Suszeptanz (Imaginärteil)  $\underline{b}$ :

$$\underline{y}_{ij}^{abc} = \underline{g}_{ij}^{abc} + j\underline{b}_{ij}^{abc} \quad (2.10)$$

Die Inverse der Matrix mit dem Adjunkten  $adj \underline{z}_{ij}^{abc}$  hat dann die explizite Darstellung

$$\begin{aligned} \underline{z}_{ij}^{abc-1} &= \frac{1}{\det \underline{z}_{ij}^{abc}} \cdot adj \underline{z}_{ij}^{abc} \\ &= \frac{1}{z_{ij}^s{}^3 - 2z_{ij}^m{}^3 - 3z_{ij}^s z_{ij}^m{}^2} \cdot \begin{bmatrix} z_{ij}^s{}^2 - z_{ij}^m{}^2 & z_{ij}^m{}^2 - z_{ij}^s z_{ij}^m & z_{ij}^m{}^2 - z_{ij}^s z_{ij}^m \\ z_{ij}^m{}^2 - z_{ij}^s z_{ij}^m & z_{ij}^s{}^2 - z_{ij}^m{}^2 & z_{ij}^m{}^2 - z_{ij}^s z_{ij}^m \\ z_{ij}^m{}^2 - z_{ij}^s z_{ij}^m & z_{ij}^m{}^2 - z_{ij}^s z_{ij}^m & z_{ij}^s{}^2 - z_{ij}^m{}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Damit werden die Elemente der Admittanzmatrix wie folgt berechnet:

$$\underline{y}_{ij}^s = \frac{z_{ij}^s + z_{ij}^m}{(z_{ij}^s - z_{ij}^m)(z_{ij}^s + 2z_{ij}^m)} \quad (2.12)$$

$$\underline{y}_{ij}^m = -\frac{z_{ij}^m}{(z_{ij}^s - z_{ij}^m)(z_{ij}^s + 2z_{ij}^m)} \quad (2.13)$$

Ebenso wie die Impedanzmatrix ist auch die Admittanzmatrix symmetrisch aufgebaut. Die Werte auf der Diagonalen sind jeweils gleich, genauso wie die nicht diagonalen Werte. Die dreiphasigen Ströme können als Multiplikation aus Admittanzmatrix und Spannungsabfall geschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} I_{ij}^a \\ I_{ij}^b \\ I_{ij}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{ij}^s & \underline{y}_{ij}^m & \underline{y}_{ij}^m \\ \underline{y}_{ij}^m & \underline{y}_{ij}^s & \underline{y}_{ij}^m \\ \underline{y}_{ij}^m & \underline{y}_{ij}^m & \underline{y}_{ij}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{ij}^a \\ \Delta U_{ij}^b \\ \Delta U_{ij}^c \end{bmatrix}, \quad (2.13a)$$

$$\underline{I}_{ij}^{abc} = \underline{y}_{ij}^{abc} \Delta \underline{U}_{ij}^{abc} \quad (2.14b)$$

Die Admittanzmatrizen der Leitungen sind unabhängig von der Betrachtungsrichtung, sodass gilt: